

# El lago glaciar 513 (Perú). Lecciones para el desarrollo de un servicio de alerta temprana

por Christian Huggel<sup>1</sup>, Alejo Cochachin<sup>2</sup>, Fabian Drenkhan<sup>1,3,4</sup>, Javier Fluixá-Sanmartín<sup>5</sup>, Holger Frey<sup>1</sup>,  
Javier García Hernández<sup>5</sup>, Christine Jurt<sup>6</sup>, Randy Muñoz<sup>1</sup>, Karen Price<sup>7</sup> y Luis Vicuña<sup>1</sup>

El retroceso de los glaciares, acelerado en las últimas décadas debido al cambio climático, está dejando al descubierto grandes áreas de terreno en las regiones montañosas de todo el mundo. Pero una consecuencia aún más grave del deshielo es la formación de más lagos glaciares, que están aumentando de tamaño y han causado algunas de las crecidas más devastadoras en el mundo; por ejemplo, en los Andes, el Himalaya y los Alpes, donde se perdieron miles de vidas humanas y se reportaron grandes daños en las infraestructuras (Carrivick y Tweed, 2013; Bajracharya y otros, 2007; Carey, 2005). El cambio climático está remodelando rápidamente las condiciones de vida en las zonas de alta montaña, alterando los patrones de las crecidas y creando nuevos riesgos de desbordamiento, dejando a las poblaciones en peligro inminente en varias regiones (Cook y otros, 2016; Emmer y otros, 2015; Frey y otros, 2016; Drenkhan y otros, 2019).

La información y los servicios climáticos, glaciológicos e hidrológicos pueden desempeñar un papel esencial

para la detección temprana de posibles peligros y riesgos, y para reducir eficazmente estos últimos. Sin embargo, la infraestructura para los servicios climáticos y afines está poco desarrollada en muchas regiones de alta montaña y debe fortalecerse sustancialmente. Este informe sobre el diseño, la implementación, la operación y las circunstancias que envuelven el establecimiento de un sistema de alerta temprana para los desbordamientos repentinos de un lago glaciar en los Andes peruanos destaca los retos relacionados con el acceso e instalación de equipos en muchas regiones de alta montaña.

## El desastre de la laguna 513

La cordillera Blanca en los Andes tropicales del Perú es una cadena montañosa cubierta de hielo con una larga historia de incidentes desastrosos de desbordamientos repentinos de lagos glaciares (Carey, 2005; 2010). Los riesgos de desbordamiento son consecuencia de unos niveles considerables de peligro físico y de altos niveles de vulnerabilidad y exposición de las poblaciones aguas abajo (Frey y otros, 2018). El lago glaciar de la laguna 513 (9°12'45" S, 77°33'00" W) se encuentra a 4 428 metros (m)

- 1 Departamento de Geografía, Universidad de Zurich, Zurich (Suiza)
- 2 Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas, Autoridad Nacional del Agua (ANA), Huaraz (Perú)
- 3 Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima (Perú)
- 4 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Imperial College London, Londres (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte)
- 5 Centro de Investigación sobre el Medio Ambiente Alpino (CREALP), Sion (Suiza)
- 6 Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna, Escuela de Agricultura, Ciencias Forestales y Alimentarias (HAFL), Berna (Suiza)
- 7 CARE Perú, Lima (Perú)

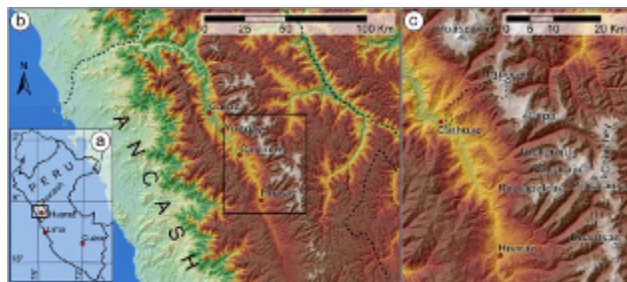
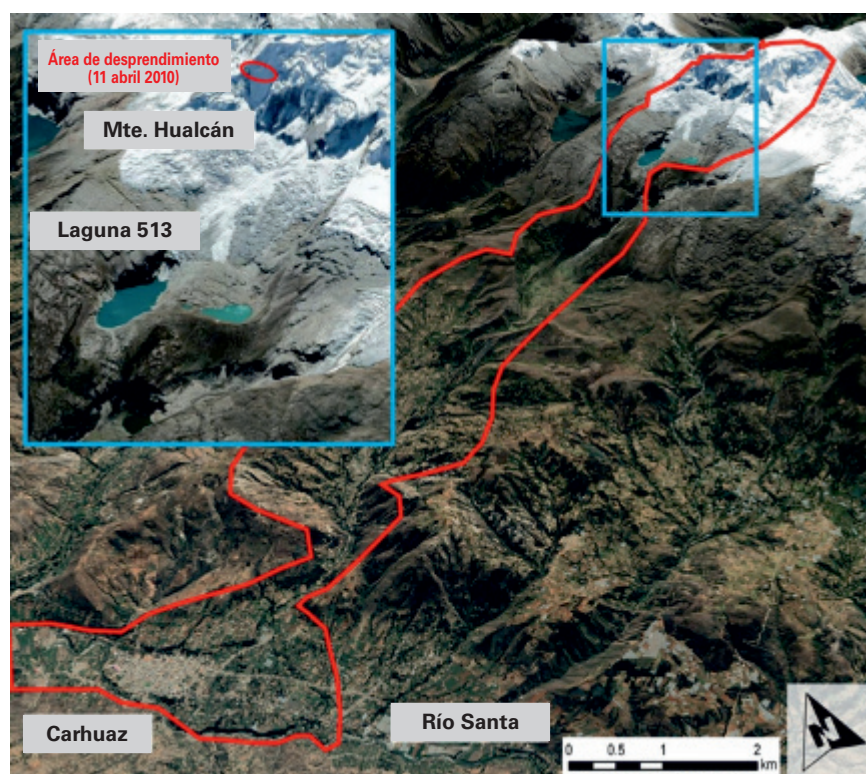


Figura 1. Localización del sitio: a) Perú, b) cordillera Blanca y c) área de Hualcán-Carhuaz (en línea discontinua).



*Figura 2. Mapa general de Laguna 513 y Carhuaz, donde se señala la zona de origen de la avalancha de hielo de 2010 que produjo el desbordamiento repentino del lago glaciar que llegó hasta Carhuaz.*

sobre el nivel del mar al pie del monte Hualcán (6 104 m) en la cuenca del río Santa (figuras 1 y 2). El lago, que se formó a finales de la década de 1960 como resultado del retroceso del glaciar, fue declarado altamente peligroso en 1988 y sometido a exhaustivos trabajos de seguridad para reducir artificialmente su nivel unos 20 m hasta 1994. Esto no redujo el riesgo de desbordamientos a cero, aunque la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de los mismos disminuyeron sustancialmente. En 2004, las autoridades y expertos elaboraron un informe que ponía de manifiesto que el lago podría considerarse seguro debido a la infraestructura existente (INDECI, 2004; Muñoz y otros, 2016).

Sin embargo, la laguna 513 recibió un fuerte impacto cuando una avalancha de rocas y hielo de 450 000 metros cúbicos ( $m^3$ ) se desprendió de la ladera suroeste del monte Hualcán (Carey y otros, 2012) (figura 2) el 11 de abril de 2010, aproximadamente a las 8 de la mañana hora local. La avalancha causó una ola impulsora similar a un tsunami en el lago, que provocó un desbordamiento de la presa a pesar de sus más de 20 m de francobordo. Las huellas de la ola indican un rebosamiento de la presa en aproximadamente 5 m, que corresponde a una altura de ola de unos 24 a 25 m, con una velocidad máxima de descarga de varias decenas de miles de  $m^3$  por segundo (Schneider y otros, 2014).

El desbordamiento repentino resultante dañó varios puentes, la infraestructura del servicio de agua a lo largo de su trayectoria y finalmente llegó al cono de residuos de la ciudad de Carhuaz (con unos 20 000 habitantes), donde el material grueso del desbordamiento se depositó. Un total de 0,7  $km^2$  de tierras agrícolas resultaron sepultadas y la carretera del valle de Santa se vio afectada, pero no se perdieron vidas.

Las autoridades locales y nacionales, así como expertos peruanos e internacionales, se reunieron en las semanas posteriores al desastre para discutir formas de proteger mejor a las personas y sus bienes ante futuros incidentes. Como resultado de ello, en 2011 se iniciaron los planes para contar con un sistema de alerta temprana (SAT) de desbordamientos repentinos de lagos glaciares y se implementaron en tres años. El SAT para este tipo de desbordamientos, el primero en la región andina, se creó en el marco del Proyecto Glaciares ([www.proyectoglaciares.pe](http://www.proyectoglaciares.pe)) con el apoyo financiero de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). CARE Perú y la Universidad de Zurich pusieron en marcha conjuntamente el SAT en estrecha colaboración con el municipio de Carhuaz y la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA) y su Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas (antigua Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, UGRH) en Huaraz.

## Desarrollo e implementación de un sistema de alerta temprana de desbordamientos repentinos de lagos glaciares

El diseño, la organización y el funcionamiento del SAT de desbordamientos repentinos de lagos glaciares se estructuraron conforme a los componentes reconocidos internacionalmente de un SAT (cf. Fluixá-Sanmartín y otros, 2018):

1. Conocimiento del riesgo.
2. Vigilancia y aviso.
3. Difusión y comunicación.
4. Capacidad de respuesta.

### Conocimiento del riesgo

Comprender los riesgos que se plantean en una localización particular es fundamental para el diseño de un SAT. Los riesgos pueden evaluarse utilizando métodos establecidos que analizan los peligros físicos mediante indicadores críticos y umbrales (en este caso relacionados con los diferentes componentes implicados en el proceso de desbordamientos repentinos de lagos glaciares), la exposición de personas y bienes (por ejemplo, infraestructura) y la vulnerabilidad (por ejemplo, social o económica) de los elementos en riesgo. Las evaluaciones exhaustivas de los riesgos para el caso de desbordamientos repentinos de lagos glaciares son escasas (Allen y otros, 2016) y complejas porque estos desbordamientos son típicamente los resultados de una cascada de procesos de activación y propagación de flujo másico (Schneider y otros, 2014; Westoby y otros, 2014).

El desbordamiento repentino de 2010 sirvió como referencia para analizar los peligros físicos al simular la cascada de procesos con un enfoque iterativo de modelos acoplados, numéricos con base física de desplazamiento de masas y modelos hidrodinámicos (RAMMS e IBER). Esta cadena de modelos se usó para simular tres posibles escenarios futuros de diferentes magnitudes (pequeña, mediana y grande) y las probabilidades correspondientes de ocurrencia (alta, media y baja, respectivamente). Este procedimiento de evaluación de riesgos siguió los estándares internacionales y estuvo en línea con las pautas recientemente establecidas por la Comisión Internacional sobre Peligros Glaciares y Permafrost

en Alta Montaña ([www.gaphaz.org](http://www.gaphaz.org)), una comisión conjunta de la Asociación Internacional de Ciencias de la Criosfera y la Asociación Internacional del Permafrost (IPA). La modelización, junto con los estudios sobre el terreno, dio como resultado un mapa de riesgo de desbordamientos repentinos de lagos glaciares para las comunidades locales y la ciudad de Carhuaz (Schneider y otros, 2014) (figura 3). La exposición y la vulnerabilidad se evaluaron utilizando fuentes de datos disponibles públicamente (como los datos del censo) y estudios adicionales en las cuencas.

Sin embargo, los riesgos son percibidos de maneras muy distintas por distintos actores. Es un desafío comprender y tener en cuenta estas diferencias de percepción, pero esto es esencial para la amplia aceptación por el usuario y el éxito a largo plazo de las medidas de reducción de riesgos. Se realizaron repetidos talleres en las diferentes comunidades de la cuenca para conocer las percepciones de riesgo y las prioridades de los líderes locales y la población. En una etapa posterior, también se llevaron a cabo estudios etnográficos en la cuenca, que incluyeron visitas de investigación más largas (de varios meses) a las comunidades locales, que fueron importantes para obtener una comprensión más profunda de cómo los habitantes locales perciben su entorno natural y las relaciones que mantienen con las montañas, los glaciares y los lagos que les rodean. Esto llevó a entender mejor cómo la población ha percibido los diversos tipos de riesgos y cómo ha comprendido las conexiones entre esos riesgos y los involucrados en el proyecto del SAT de desbordamientos repentinos. De este modo, se destacaron los aspectos culturales y políticos y surgieron las preocupaciones de la población sobre el agua, es decir, la disponibilidad de agua, principalmente en términos de acceso a la misma (por ejemplo, derechos de agua y asignación).

### Vigilancia y aviso

La vigilancia y el aviso son los elementos centrales de un SAT. Los instrumentos de vigilancia y la medición técnica deben configurarse para detectar los riesgos y poder emitir los avisos oportunos. El reto está en identificar los procesos y variables ambientales que son críticos para la detección temprana de un fenómeno extremo (como un desbordamiento repentino), y que son medibles por sensores. Las ideas extraídas de los procesos obtenidos de la reconstrucción del desbordamiento repentino de 2010, y la mejor comprensión de estos, así como la modelización de posibles escenarios futuros (elemento de conocimiento del riesgo) sirvieron





*Figura 3. Estaciones y centro de recepción del SAT de la laguna 513. De izquierda a derecha: estación en la laguna 513, en Pampa Shonquil, y repetidor; y centro de recepción de datos en el municipio de Carhuaz.*

para identificar dónde y qué medir y vigilar. El conocimiento del tiempo de propagación del desbordamiento repentino, desde la activación hasta la llegada a los centros de población, es, por ejemplo, fundamental para el diseño de un SAT y para su posterior visualización y planificación con las autoridades y comunidades locales (véase “Difusión y comunicación”).

Los proyectos de referencia para el SAT de desbordamientos repentinos eran escasos en el momento del diseño para la laguna 513 (2011/2012), y completamente inexistentes para la región de América Latina. El “buen hacer” de dicho diseño reside en tener en cuenta todos los posibles procesos de activación de desbordamientos mientras se mide el momento en el que se puede hacer aún un aviso a tiempo. Los diferentes tipos de procesos de activación de desbordamientos (avalanchas de hielo, inestabilidades de morrena, desprendimiento de rocas en pendientes pronunciadas) dependen en gran medida de las condiciones locales. Resulta fundamental comprender adecuadamente el entorno físico y la interacción de los procesos que pueden dar lugar a diferentes escenarios de desbordamiento.

El entorno físico extremo y severo en el que se forman los lagos glaciares (como origen de los desbordamientos repentinos) constituye a menudo la mayor dificultad. A grandes altitudes, como la de la laguna 513, hay grandes fluctuaciones diarias de temperatura, largos períodos de nubosidad, fuertes precipitaciones y alta radiación solar, así como una topografía empinada en un entorno remoto. Todos estos factores deben considerarse en el diseño y la implementación. Los científicos, y a la vez

aventureros, de los SAT de desbordamientos repentinos tuvieron que tomar medidas para reducir el consumo energético de los equipos, las complicaciones con la transmisión de datos desde los sensores y las limitaciones de acceso para la instalación de sensores y para llevar a cabo las frecuentes tareas de seguimiento y mantenimiento.

Otro elemento crucial para la vigilancia y el aviso, en particular para un SAT en entornos extremos como en este caso, es la redundancia en el sistema. Incluso en un SAT bien calibrado y probado, es probable que ocurra un fallo en un sensor o en la transmisión de datos en algún momento; una redundancia suficiente es indispensable para evitar que el fallo del sensor provoque un fallo en todo el conjunto del SAT.

Un problema adicional es la financiación del mantenimiento a largo plazo de un SAT. Los municipios pequeños con un presupuesto limitado tienen otras prioridades, como invertir en servicios de salud y educación.

Con el conocimiento y la información recopilados, el equipo local e internacional trabajó de forma conjunta, cada uno aportando su experiencia, para diseñar un SAT que superaría los desafíos de la laguna 513. El diseño comprendía dos estaciones: una estación principal en la presa de la laguna 513 y otra estación en Pampa Shonquil, que incluía instrumentos de medición meteorológica: un centro de datos en el municipio de Carhuaz, una estación de avisos en la comunidad de Pariacaca y una estación repetidora para transferir la señal del lago al centro de datos (figura 3).

Las estaciones fueron equipadas con los siguientes instrumentos:

1. Centro de datos de Carhuaz (2 640 m s. n. m.): antena receptora, pantalla con acceso a datos en tiempo real, servidor para almacenamiento de datos, infraestructura para la emisión de alertas.
2. Estación repetidora (3 189 m s. n. m.): antena receptora y emisora.
3. Estación de laguna 513 (4 491 m s. n. m.): 2 cámaras que toman fotos cada 5 segundos durante el día, una mirando a la cara del monte Hualcán, y otra observando la presa. 4 geófonos (dispositivos que registran los movimientos del suelo y los convierten en voltaje) situados cerca de la estación, que miden y envían datos continuamente en intervalos de 5 segundos, para detectar posibles movimientos de masa (por ejemplo, avalancha de hielo) que impacten en el lago. Antena de recepción y transmisión y registrador de datos.
4. Estación Pampa Shonquil (3 600 m s. n. m.): estación de descarga fluvial (con sensor de presión), estación meteorológica con sensores para medir la temperatura y la humedad del aire, la precipitación, la velocidad del viento y la radiación solar. Antena de transmisión y registrador de datos.
5. Estación de aviso y recepción de información en Pariacaca (3 138 m s. n. m.): el sistema de vigilancia informa a la población local sobre incidentes en la laguna 513 y las sirenas activadas desde el Centro de Datos de Carhuaz facilitan la evacuación.

Todas las estaciones estaban equipadas con paneles solares y baterías para la generación y almacenamiento de energía, sin embargo, su disponibilidad siguió siendo un factor limitante, en particular en la estación del lago glacial, ya que los picos de la cordillera Blanca tienen una alta frecuencia de cobertura de nubes. Cada estación tenía un mástil donde se fijaban la mayoría de los instrumentos, una caja de hormigón con cerradura para el equipo electrónico y una valla protectora. Los grupos electrógenos de emergencia estaban disponibles en el edificio municipal para evitar pérdidas de datos e interrupciones en el acceso durante los apagones.

Los geófonos fueron los principales instrumentos utilizados para registrar una posible activación de desbordamientos repentinos. Las cámaras de respaldo podían

utilizarse para obtener una visión general de la situación actual y, particularmente durante la fase de prueba del sistema, para relacionar las mediciones del geófono con la magnitud de los eventos (avalanchas). El sensor de presión en el lecho del río en la estación de Pampa Shonquil agregaba redundancia al sistema y, si se tomaban mediciones de calibración, podría usarse para registrar continuamente la escorrentía. Más tarde, se planeó instalar sensores de cable en el lecho del canal del río debajo de la laguna 513 que detectarían una descarga de corriente fluvial inusualmente alta y peligrosa, que podría aplicarse en los sistemas de alerta de flujo de sedimentos.

Un elemento importante del SAT fue una cabaña permanentemente atendida por guardias al lado de la estación en Pampa Shonquil, especialmente para considerar la redundancia. Su objetivo principal era controlar el abastecimiento de agua dulce para el municipio de Carhuaz, pero la ubicación les daba a los guardias una vista perfecta hacia la laguna 513, y podrían enviar avisos a las autoridades por radio en caso de un incidente (como fue el caso en el de 2010).

Por seguridad, todos los datos se almacenan primero en el registrador de datos respectivo en cada estación, luego se transmiten en intervalos de 5 segundos al servidor del centro de datos, que tiene una copia de seguridad en la nube. Todos los datos se transfieren directamente a un sitio web que permite el acceso remoto en tiempo real. En el propio centro de datos, una oficina independiente en el municipio de Carhuaz, una pantalla muestra continuamente los datos de esta página web.

Los protocolos de avisos representan elementos esenciales de un SAT. El protocolo documenta y define los procedimientos de aviso, típicamente diferenciando una serie de niveles de aviso y acciones asociadas, así como las instituciones, organizaciones o comités y las personas responsables. Las leyes, normas y directrices locales, regionales y nacionales debieron tenerse en cuenta en el protocolo de alerta de la laguna 513. Los miembros del Centro Local de Operaciones de Emergencia, protección civil, funcionarios gubernamentales seleccionados y el alcalde, que tiene la autoridad para emitir la alerta de evacuación, tuvieron que participar. En consecuencia, el protocolo vino acompañado de una lista de personas responsables y sus números de teléfono. Definió tres niveles de alertas (amarillo, naranja y rojo) más un nivel normal verde de referencia y cómo se alcanzan estos niveles de alerta y qué tipo de acciones deben tomarse. Para este propósito, hubo que determinar los umbrales

de las variables físicas y los procesos en función de las mediciones del sensor. La definición de estos umbrales es crítica e implica un período largo de calibración y prueba, habitualmente de muchos meses, especialmente si no hay mediciones previas disponibles como en el caso de la laguna 513.

## Difusión y comunicación

Si las mediciones en un geófono superan un umbral definido, se envía automáticamente a los teléfonos móviles de todo el personal responsable identificado en el protocolo de avisos un mensaje corto para verificar inmediatamente los datos y la información del SAT. Los siguientes pasos a seguir se basan en el plan de acción y en los datos disponibles. El SAT no puede activar automáticamente las alarmas porque, según la ley peruana, solo el alcalde puede autorizar una evacuación.

El módulo de alarma de Carhuaz tiene dos sirenas acústicas de largo alcance y la capacidad de enviar mensajes de texto predefinidos a los líderes de la comunidad y de distrito y a todos los interesados, como directores de escuelas, jefes de hospitales, policías y bomberos. Las comunidades aguas arriba de Carhuaz reciben los avisos y la información asociada a través del Centro Local de Operaciones de Emergencia y las autoridades centrales de Carhuaz. Pariacaca, que se encuentra en el camino de la crecida y tiene una estación de avisos con sirenas. Además, los protocolos del SAT se adaptaron para ajustarse a los protocolos peruanos de evaluación de riesgos, permitiendo la comunicación con el Centro Nacional de Operaciones de Emergencia en Lima para pedir ayuda (Muñoz y otros, 2016).

## Capacidad de respuesta

La capacidad de las personas en riesgo para responder adecuadamente a los niveles de aviso emitidos es posiblemente el elemento más crítico de un SAT; también es el más susceptible a fallos como último elemento de la cadena del SAT. Los fallos o errores a lo largo de la cadena de vigilancia y aviso deben ser ajustados de tal manera que este último elemento no se vea afectado o amenazado negativamente.

Para el SAT de la laguna 513, se realizaron sesiones de información con la población en riesgo. Durante ellas, se explicó y discutió el concepto y la funcionalidad del SAT, así como sus potenciales y limitaciones, y las instrucciones claras sobre las acciones que deben tomarse

en caso de una alarma, como la directiva para escapar inmediatamente de las zonas amenazadas y una indicación clara de las rutas de evacuación y las zonas de seguridad. El servicio de protección civil de Carhuaz preparó un mapa detallado con todas las rutas de evacuación sobre la base del mapa de riesgos desarrollado en la fase de conocimiento de riesgos del diseño del SAT de desbordamientos repentinos. Varias veces al año se programan simulacros de emergencia para todo el país, ya que el riesgo sísmico de Perú es muy alto. Dichos simulacros, algunos de ellos realizados durante la noche, se han utilizado para exponer tanto a la población como a las autoridades responsables a una prueba de evacuación en condiciones casi reales, y para familiarizarlos con el SAT de la laguna 513.

## Aspectos operativos y lecciones aprendidas

En 2010, cuando comenzaron las discusiones y actividades relacionadas con el SAT de desbordamientos repentinos, Carhuaz era el principal actor local y el centro de recepción de datos e información. Sin embargo, las dimensiones técnicas, operativas y sociales del SAT estaban más allá de la capacidad de una ciudad tan pequeña. La dilatada experiencia nacional e internacional, que requería una presencia regular en el sitio y la creación de capacidad conjunta permanente y el intercambio con las personas y autoridades locales, era indispensable para abordar los desafíos. En julio de 2015, la responsabilidad total del SAT fue entregada a las autoridades locales en una ceremonia a la que asistieron representantes de los gobiernos local, provincial y nacional del Perú, del gobierno suizo y de las comunidades y escuelas locales, así como expertos nacionales e internacionales. Para entonces, el SAT había sido titular de los medios de comunicación peruanos, suizos e internacionales.

En 2016, gran parte de los Andes tropicales centrales, incluida la región de la cordillera Blanca, se vio afectada por una fuerte sequía. En años normales, después de la larga temporada seca del invierno austral, los agricultores cuentan con el inicio de la temporada de lluvias en octubre. En 2016, no se registraron precipitaciones en octubre ni en noviembre.

Después de que algunos habitantes locales pidieran primero que se retirara el SAT (cf. Fraser, 2017), los agricultores se desesperaron y comenzaron a correr rumores de que los pluviómetros y las antenas del SAT en la laguna 513 eran los responsables de la escasez de lluvia.

En un giro bastante dramático de los acontecimientos, impulsado por factores políticos de poder a nivel comunitario y por la deficiente comunicación de las autoridades sobre los fenómenos meteorológicos extraordinarios, un gran número de lugareños se reunieron en la laguna 513 el 24 de noviembre y decidieron dismantelar la estación del SAT en el lago. Las reacciones a nivel local, nacional e internacional fueron enérgicas. Hubo una diversidad motivada e incontrolada de partidarios del SAT en las redes sociales. Otros expresaron incompreensión, disgusto, vergüenza y criticaron la exposición voluntaria de vidas en riesgo por esta acción destructiva.

La destrucción de la estación afectó a los componentes de vigilancia y aviso del SAT desde un punto de vista técnico y operativo. Pero el servicio se pudo mantener gracias a los guardias ubicados en el sitio intermedio (Pampa Shonquil). La capacidad de respuesta y los mecanismos institucionales no se vieron afectados. Sin embargo, fue crucial comprender las causas profundas de esta acción.

Los resultados de una investigación exhaustiva sobre el incidente, que se centró en las ciencias sociales, se resumen a continuación. Las lecciones aprendidas son relevantes para el desarrollo de los servicios climáticos y de avisos más allá del Perú.

- El dismantelamiento de las estaciones meteorológicas y del SAT por parte de la población local no es exclusivo de este sitio, ni de Perú. Incidentes similares han ocurrido en otras regiones, como el Himalaya, los Andes y los Alpes de Europa, aunque esas experiencias estaban poco documentadas.
- Los conflictos locales intra e intercomunitarios, así como la desconfianza y los prejuicios contra la participación e instalaciones de instituciones externas, pueden tener un fuerte impacto, pero invisible, en la aceptación.
- La relación de la población local (expuesta al riesgo) con su entorno natural y sus percepciones de los diferentes riesgos determinan en gran medida su actitud hacia los esfuerzos de reducción de riesgos. Las perspectivas locales pueden diferir sustancialmente de las gubernamentales o de las técnicas y científicas. Por ejemplo, la población local puede tener sentimientos profundos con montañas, glaciares y lagos como lugares de espiritualidad y el origen de la vida. Por lo tanto, un desbordamiento repentino puede entenderse como una reacción de, por ejemplo, un glaciar (como espíritu de montaña) y un lago

(como un ser) a la perturbación humana o al comportamiento humano inapropiado. El acervo y las narrativas tradicionales tienen que conocerse y reconocerse como parte de un diálogo constructivo y en la búsqueda de soluciones aceptables.

- Como consecuencia, la adquisición de una comprensión profunda de las condiciones sociales, políticas y culturales, particularmente en términos de dinámica de poder, es un requisito previo para la alerta temprana, así como en general para el desarrollo de servicios de adaptación climática. Es necesaria la colaboración entre las diversas personas, actores y expertos, incluyendo poblaciones locales, científicos físicos y sociales, ingenieros, gobiernos locales, instituciones gubernamentales técnicas y organizaciones no gubernamentales (ONG). Se alienta a dar a las ciencias sociales un papel más destacado.
- Las autoridades a menudo creen que un SAT es sobre todo un sistema de medición técnica y transmisión de datos. El reconocimiento de que un SAT también consta de componentes institucionales, sociales, culturales y políticos es fundamental porque un SAT solo puede ser operativo si todos los componentes cumplen su función. Además, es fundamental que tanto las autoridades locales como la población comprendan que un SAT no puede reducir los riesgos a cero: su objetivo principal es evitar daños a las vidas humanas. Por lo tanto, debe ir acompañado de otras medidas de reducción de riesgos, en particular de una planificación adecuada del uso del terreno.

## Conclusión

Los SAT en entornos extremos, como los lagos glaciares, presentan muchos desafíos. El sistema debe diseñarse cuidadosamente para obtener un suministro de energía robusto, una transmisión de datos fiable y exenta de problemas, la medición de variables físicas críticas y el grado de redundancia requerido. Son indispensables muchos meses de calibración del sistema. Las autoridades locales deben entender esto claramente. Además, el mantenimiento del SAT debe ser presupuestado anualmente por las autoridades locales para garantizar la sostenibilidad del sistema.

El SAT de la laguna 513 se ha convertido en el modelo para algunos otros SAT en los Andes peruanos (por ejemplo, Huaraz-Palcacocha, Urubamba-Chicón) y otras zonas. Si bien la experiencia y el desarrollo de la



capacidad se pueden replicar, también es crucial reconocer que cada localización es un caso individual con características especiales que requieren una atención adecuada.

## Referencias

- Allen, S. K., Linsbauer, A., Randhawa, S. S., Huggel, C., Rana, P. y Kumari, A., 2016. Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, India: an integrative and anticipatory approach considering current and future threats. *Nat Hazards* 84, 1741-1763. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2511-x>
- Bajracharya, B., Shrestha, A. B. y Rajbhandari, L., 2007. Glacial Lake Outburst Floods in the Sagarmatha Region. *Mt. Res. Dev.* 27, 336-344. <https://doi.org/10.1659/mrd.0783>
- Carey, M., 2010. In the Shadow of Melting Glaciers: Climate Change and Andean Society. Oxford University Press, Oxford.
- Carey, M., 2005. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Glob. Planet. Change* 47, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.007>
- Carrivick, J. L. y Tweed, F. S., 2013. Proglacial Lakes: Character, behaviour and geological importance. *Quat. Sci. Rev.* 78, 34-52. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.02>
- Cook, S. J., Kougkoulos, I., Edwards, L. A., Dortch, J. y Hoffmann, D., 2016. Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. *Cryosph.* 10, 2399-2413. <https://doi.org/10.5194/tc-2016-140>
- Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L. y Haeberli, W., 2019. Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin. *Sci. Total Environ.* 665, 465-483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Emmer, A., Merkl, S. y Mergili, M., 2015. Spatiotemporal patterns of high-mountain lakes and related hazards in western Austria. *Geomorphology* 246, 602-616. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.032>
- Fluixá-Sanmartín, J., García Hernández, J., Huggel, C., Frey, H., Cochachin Rapre, A., Gonzales Alfaro, C. A., Román, L. M. y Masías Chacón, P. A., 2018. Highlights and Lessons from the Implementation of an Early Warning System for Glacier Lake Outburst Floods in Carhuaz, Peru. *Technol. Dev.* 187-200. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91068-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91068-0_16)
- Fraser, B., 2017. Learning from flood-alarm system's fate-Carhuaz, Peru. *EcoAméricas* April 2017, 6-8.
- Frey, H., Huggel, C., Bühler, Y., Buis, D., Burga, M. D., Choquevilca, W., Fernández, F., García Hernández, J., Giráldez, C., Loarte, E., Masías, P., Portocarrero, C., Vicuña, L. y Walser, M., 2016. A robust debris-flow and GLOF risk management strategy for a data-scarce catchment in Santa Teresa, Peru. *Landslides* 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0669-z>
- Frey, H., Huggel, C., Chisolm, R. E., Baer, P., McArdeell, B., Cochachin, A. y Portocarrero, C., 2018. Multi-Source Glacial Lake Outburst Flood Hazard Assessment and Mapping for Huaraz, Cordillera Blanca, Peru. *Front. Earth Sci.* 6, 1-16. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00210>
- INDECI, 2004. Mapa de peligro, plan de usos de suelo y medidas de mitigación ante desastres Ciudad de Carhuaz, Primera. INDECI, Lima, Perú.
- Muñoz, R., Gonzales, C., Price, K., Rosario, A., Huggel, C., Frey, H., García, J., Cochachin, A., Portocarrero, C. y Mesa, L., 2016. Managing Glacier Related Risks Disaster in the Chucchún Catchment, Cordillera Blanca, Peru. En: *Climate Change Adaptation Strategies – An Upstream-downstream Perspective*. Springer International Publishing, Cham, 59-78.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S. y García, J., 2014. Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Adv. Geosci.* 35, 145-155. <https://doi.org/10.5194/adgeo-35-145-2014>
- Westoby, M. J., Glasser, N. F., Brasington, J., Hambrey, M. J., Quincey, D. J. y Reynolds, J. M., 2014. Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. *Earth-Science Reviews* 134, 137-159. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev>